

**Escuela Politécnica Superior**  
Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales  
INGENIERÍA INDUSTRIAL

**Resumen del Proyecto Final de Carrera**

# **Diseño y fabricación de moldes complejos para powder injection moulding**

*Autor*

Miguel Ángel Enríquez Baranda

*Tutores*

Efraín Carreño Morelli

Glenn Flückiger

Alejandro Várez Álvarez

Febrero 2010

---

# INDICE GENERAL

<b>1</b>	<b>INTRODUCCION Y OBJETIVOS.....</b>	<b>1-3</b>
<b>2</b>	<b>DESCRIPCION DE LA ESTRUCTURA DEL PROYECTO .....</b>	<b>2-5</b>
<b>3</b>	<b>EJEMPLO DISEÑO MOLDES: TOROIDE .....</b>	<b>3-7</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS.....</b>	<b>4-14</b>

# 1 INTRODUCCION Y OBJETIVOS

El presente proyecto ha sido desarrollado a través de un acuerdo entre las universidades Carlos III de Madrid y Haute Ecole Spécialisée de Suisse Occidentale (HES-SO Valais). El alumno D. Miguel Ángel Enríquez Baranda ha desarrollado el proyecto durante el periodo establecido entre septiembre de 2009 y febrero de 2010, en el Instituto de Sistemas Industriales, de la HES-SO Valais.

El alumno ha tenido como tutores del proyecto al Dr. Alejandro Várez Álvarez, en España y a los Doctores Efraín Carreño Morelli y Glen Flukiger, en Suiza.

El tema principal a estudio es el diseño y fabricación de moldes complejos para tecnología powder injection moulding (PIM), que engloba todo el proceso de producción, desde la concepción de la idea, hasta las pruebas finales con varios feedstocks.

Los moldes diseñados son los siguientes

- Molde para un toroide para ensayos de caracterización de piezas magnéticas concebidas por PIM.
- Molde para probetas de tracción de tipo dog-bone.
- Molde para probetas de tracción de tipo plano.
- Molde para pieza de ensayo de moldabilidad microstep.

Posteriormente también se han desarrollado las siguientes etapas del proceso PIM, dentro del proceso de ensayo de los moldes diseñados:

- Composición feedstock: Mezcla de polvos y aditivos.
- Montaje y preparación máquina inyectora ARBURG 221 K
- Ensayos de inyección con varios feedstocks
- Proceso de solvent debinding (Debinding soluble)
- Procesos térmicos debinding y sintering (Deliantado y sinterizado)

Para el proceso de testeo de los moldes, se han empleado feedstocks de carácter ferro magnético ( $\text{Fe-2,7\%Si}$ ) y cerámico ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

Finalmente se ha incluido un estudio de rentabilidad económica y viabilidad de la tecnología PIM. Además se han elaborado varios métodos de cálculo de coste de fabricación de un molde.

---

En resumen el proyecto abarca todas las etapas de la *Tecnología de Polvos* y del *Moldeo por Inyección*, resultando un trabajo final muy completo e ilustrativo.

## 2 DESCRIPCION DE LA ESTRUCTURA DEL PROYECTO

El proyecto consta de 10 capítulos de los cuales se pueden destacar los siguientes:

- **Prefacio:** Breve reseña histórica que sitúa el proyecto dentro del contexto de la tecnología Powder Injection Moulding.
- **Objetivos:** Descripción de las metas propuestas y el ámbito a estudio dentro del trabajo.
- **Introducción:** Parte teórica del proyecto que consta de 3 partes:
  - Descripción teórica del powder injection moulding.
  - Proceso de moldeo.
  - Diseño general de moldes.
- **Diseño:** Esta es la sección fundamental del proyecto, donde se detalla el proceso de concepción de cada molde y sus posibles variantes. Engloba el diseño de los siguientes moldes:
  - Toroide.
  - Dog-Bone.
  - Flat-Specimen.
  - Doble cavidad para piezas de ensayo.
  - Microstep.

Al tratarse de la parte fundamental del proyecto (junto con los planos, Anexo II), en la siguiente parte del resumen, se describe simplifcadamente a modo de ejemplo el diseño del molde del toroide.

- **Experimental:** Esta es la parte dedicada a describir el proceso de testeo de los moldes con varios feedstocks, así como el resto de operaciones realizadas dentro del proceso de powder injection moulding. Se incluyen los siguiente subapartados:
  - Maquinas y equipamiento utilizados
  - Elaboración del feedstock.
  - Proceso de inyección.
  - Solvent debinding
  - Procesos térmicos debinding and sintering

- **Viabilidad y estudio económico:** Capítulo dedicado a la descripción de los costes y la magnitud que representa la implantación de la tecnología PIM, en la industria actual. Además de detallan tres modelos de cálculo del coste de fabricación de un molde:
  - *University of Rhode Island.*
  - *Boothroyd, Dewhurst and Knight.*
  - *HES-SO Valais Method.*
- **Conclusiones y perspectiva:** Además de los planos de diseño y la propia fabricación de los moldes, se pueden extraer varias conclusiones e ideas importantes a partir de este trabajo.
- **Bibliografía:** Material de soporte utilizado. Destacando a Randal M. German y a John P. Beaumont.
- **Anexos:** Apartados que complementan la memoria del proyecto con amplios detalles sobre varios puntos. En esta parte se incluyen los planos de fabricación y ensamblaje.
- **Agradecimientos:** Breves comentarios agradeciendo el tiempo y la dedicación aportada por algunos colaboradores.

### 3 EJEMPLO DISEÑO MOLDE: TOROIDE

En la siguiente parta se detalla a grandes rasgos, un ejemplo de diseño de uno de los moldes, abarcando sus diferentes placas (fija, móvil y de eyectores). Cada elemento está diseñado para operar en una máquina inyectora ARBURG 221K, descrita en el anexo I y en el apartado 5.1.2. Los planos de cada molde están recogidos en el anexo II. Estos componentes van situados dentro del soporte general del molde, tal y como se recoge en el anexo III.

#### MOLDE TOROIDE

El primer molde a diseñar ha sido para obtener formas toroidicas. El objetivo has sido fabricar piezas que permitir estudiar la caracterización de las propiedades mecánicas.



Figura - Toroide

#### SECCION DE LA PIEZA

Una de las primeras decisiones ha sido determinar la sección de la pieza. Entre las posibles opciones, cuadrada o circular, se ha optado por la primera para facilitar la extracción de la pieza.

#### DIMENSIONES DE LA PIEZA

Respecto a las dimensiones de la pieza, se ha establecido que las medidas deben de seguir las siguientes proporciones:

$$1.25 \leq D_{\text{ext}} / D_{\text{int}} \leq 1.40$$

Resultando finalmente un diámetro exterior de 50 mm e interior de 40 mm, obteniéndose un espesor de 5 mm

$$1.25 \leq 50 / 40 \leq 1.40$$

## MATERIAL DEL MOLDE

Se ha optado por un acero 1.2316 + S (16% Cr, 1% Mo), que presenta una elevada resistencia a la corrosión gracias al cromo y al molibdeno. Además la composición cuenta con aditivos de sulfuros para facilitar el mecanizado

COMPOSICION DEL ACERO								
Steel	C (wt.%)	Si (wt.%)	Mn (wt.%)	P (wt.%)	S (wt.%)	Cr (wt.%)	Mo (wt.%)	Ni (wt.%)
		max	max	max	max			max
1.2316	0.38	1.00	1.00	0.03	0.03	15.00 - 17.00	1.30	1.00

Figura - Composición del acero

## BOCA DE INYECCION (NOZZLE)

La boca de inyección utilizada ha sido diseñada para controlar la dirección de flujo de la mezcla fundida. Este componente presenta una sección interior cónica, con entrada al barril de mezcla de 2.5 mm y salida al molde de 4 mm. La longitud es de 35mm.

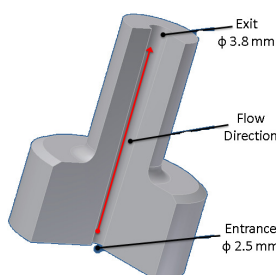


Figura - Boca de inyección

## LOCALIZACION DE LA PIEZA DENTRO DEL MOLDE Y CANALES

La parte más importante dentro del diseño de un molde, es la situación de las cavidades en el mismo. Esto engloba a la disposición de los canales, boca de inyección y orificios de salida de gases (vents).

En el caso del toroide se ha decidió utilizar un alimentación al anillo desde el exterior, minimizando la longitud del canal. Se descartan otros sistemas de entrada como la multipuerta (multigate) o la puerta en diafragma, ya que el volumen de la pieza es lo suficientemente pequeño como para facilitar un relleno continuo y rápido.



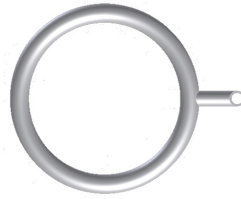


Figura – Puerta externa

También selecciono la sección del canal de alimentación de la cavidad. Entre las varias opciones se ha optado por un sección semicircular para evitar enfriamiento de la mezcla y facilitar su mecanizado.



Figura – Sección del canal

## POSICION DE LOS EYECTORES

Una vez decidida la situación de la cavidad, se estudia la extracción de la pieza. En el caso del toroide se ha optado por un eyector en la sección de entrada de flujo de diámetro 3 mm y 4 eyectores en las diagonales del anillo del toroide de 1,5 mm.

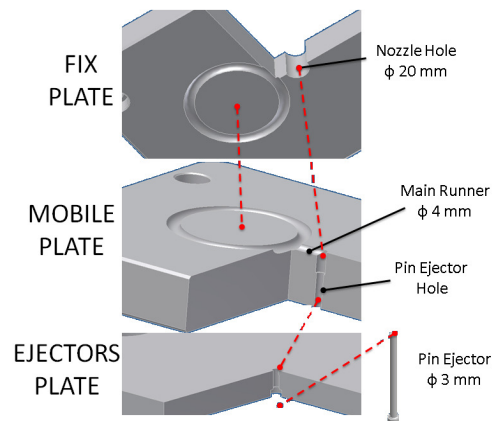


Figura – Disposición de los platos

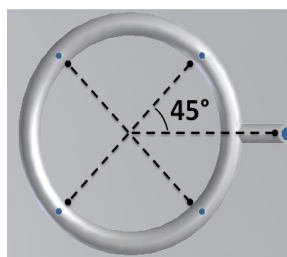


Figura – Posición de los eyectores

Respecto a la longitud de los eyectores, ha de tenerse en cuenta la sección formada por las placas y soportes para ajustar la medida. Además se debe considerar la profundidad de la cavidad, tanto de la pieza como de los canales. Finalmente se ha calculado como describe el siguiente esquema.

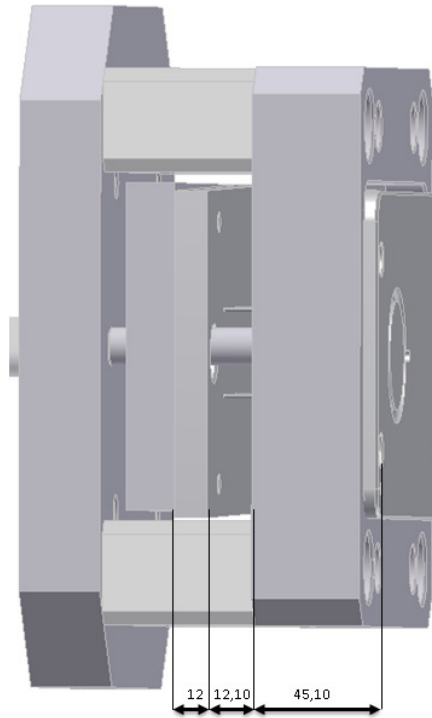


Figura – Corte eyectores

$$L_{\phi 3COLDTRAP} = (12 + 12,10 + 45,10) - L_{RUNNER} - L_{COLDTRAP} = 69,20 - 2 - 6 = 61,20mm$$

$$L_{\phi 1,5TOROID} = (12 + 12,10 + 45,10) - L_{TOROID} = 69,20 - 2,5 = 66,70mm$$

El anexo VI describe detalles sobre los eyectores seleccionados.

## COLD TRAP

Para eliminar la primera muestra de volumen en cada inyección, se utiliza una trampa para frío o “Cold Trap”, situada en la placa móvil, en la posición de la boca de inyección.

Las dimensiones estandarizadas para dicho elemento son las siguientes:

$$L_{Cold Trap} = 1,5 D_{runner}$$

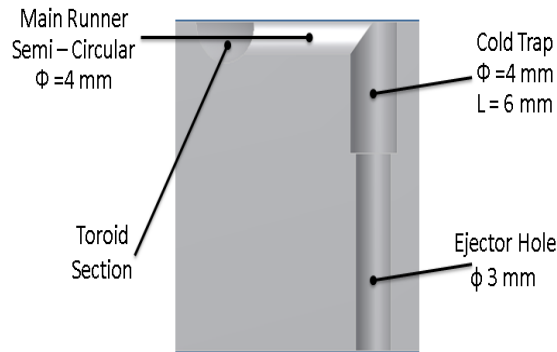


Figure – Esquema de la Cold trap

## ORIFICIOS DE VENTILACION (VENTS)

Con el fin de eliminar el aire retenido en las cavidades durante el proceso de inyección, se sitúan unos pequeños orificios que permiten la eliminación de los gases atrapados. De esta forma se mejora el proceso de relleno de la cavidad.

Tomando como referencia a John P. Beaumont, las medidas del orificio o “vent”, se describen en el siguiente esquema:

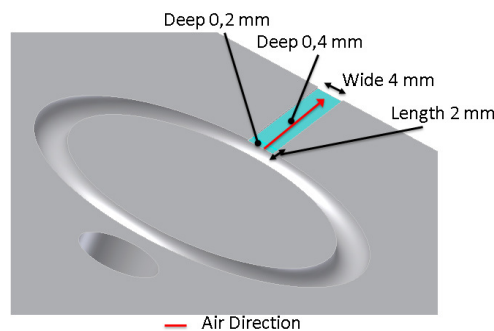


Figura – Dimensiones Vent

## CALENTADORES

Para mantener caliente el molde a una temperatura controlada, se utilizan calentadores eléctricos o térmicos. Esto permite mejorar el proceso de inyección, facilitando el relleno de las cavidades.



Figura – Calentador (vista superior)

Una temperatura recomendada para el molde puede oscilar entre los 40 – 70 °C, dependiendo del feedstock utilizado.

## VOLUMEN FINAL PIEZA

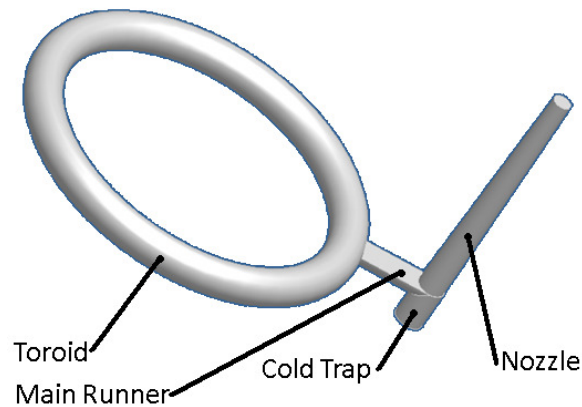


Figure 1 Pieza extraída completa

TOTAL VOLUME		
Part	2.776	cm3
Nozzle	0.277	cm3
Main Runner	0.063	cm3
Cold Trap	0.075	cm3
Adjust Nozzle - Fix Plaque	0.057	cm3
Adjust Nozzle - Cold Trap	0.008	cm3
<b>TOTAL VOLUME</b>	<b>3.232</b>	<b>cm3</b>

Figure – Volumen de las diferentes partes de la pieza extraída

## MONTAJE FINAL DEL MOLDE

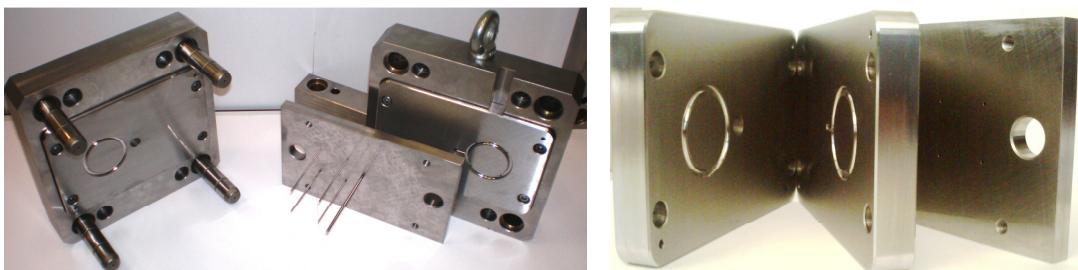
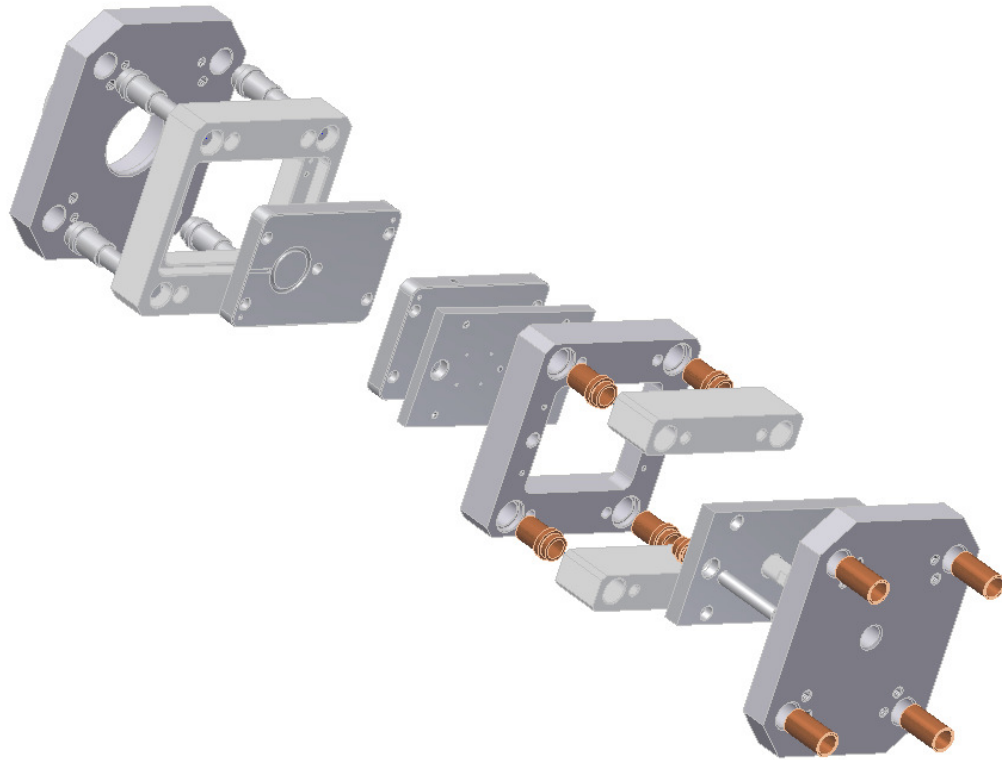


Figura – Resultado molde para toroide



Final - Ensamblaje final

## 4 CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Cinco moldes para powder injection moulding han sido diseñados. Dos de ellos han sido contruidos y probados satisfactoriamente, con feedstocks metálicos y cerámicos.

Los toroides obtenidos han sido obtenidos con materiales ferro magnéticos blandos (Fe-2.7%Si). Las piezas verdes han pasado los tratamientos de debinding y sintering satisfactoriamente.

Además, las piezas cerámicas en verde, han sido moldeadas en el molde de la doble cavidad, que incluye una válvula “switch” de diseño propio, como componente especial. Permite cambiar la dirección del flujo de feedstock, reduciendo el tiempo de set up y los costes.

Se ha realizado una comparativa entre los tres métodos de cálculo de coste desarrollados. Se ha propuesto uno de simple aplicación, con la ventaja de estar adaptado a las necesidades y especificaciones de los moldes de la HES-SO Valais.

Después del análisis desarrollado durante las etapas de diseño y experimentación, se han extraído los siguientes puntos a destacar:

El aire atrapado dentro de la cavidad del molde durante el proceso de inyección provoca problemas en el proceso de solidificación. Para corregir o mitigar este inconveniente se recomienda la colocación de orificios de salida de gases (vents).

Cuando el feedstock atraviesa la boca de inyección se produce un enfriamiento de la mezcla, que dificulta el llenado de la cavidad. Un sistema de boca de inyección caliente podría mejorar este aspecto.

La temperatura del molde es uno de los factores con mayor influencia durante el proceso de injection moulding. La temperatura ambiente puede resultar no ser suficiente para realizar un proceso correcto. Una posible solución podría ser el precalentamiento de las placas fija y móvil mediante circuitos de agua caliente, que circulen dentro de los platos o soportes.

El molde Microstep deberá ser construido en dos fases:

- Cavidad principal mediante electroerosión.
- Canales y otros mediante mecanizado.

Un nuevo sistema de recogida de las piezas dentro de la máquina inyectora, podría evitar posibles roturas y fisuras. Además se podría estudiar una manera de almacenar las piezas producidas durante el proceso de inyección. Reduciendo los tiempos de moldeo y facilitando la fabricación.

El método de coste desarrollado por *“Boothroyd, Dewhurst and Knight”* presenta demasiada sensibilidad al factor de corrección por espesor. Habitualmente una reducción de un 10% en este factor, produce una disminución de un 50% en el coste final. El factor de corrección por ancho de pieza produce un problema similar. Estos coeficientes tan sensibles limitan el uso de este método.